

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ**

УДК 621.311.2:532

А.С. МАЗУРЕНКО\*, д-р техн. наук, В.А. АРСИРИЙ\*\*, д-р техн. наук

\* Одесский национальный политехнический университет

\*\* Одесская академия строительства и архитектуры

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ЗА СЧЕТ  
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ПАТРУБКОВ**

Наведено метод проектування проточних частин допоміжних елементів енергетичного обладнання. Основою метода є візуальне дослідження структури потоків в моделях проточних частин. Дослідження закономірностей організації структури потоків дозволяє розробляти обладнання з поліпшеними енергетичними й іншими характеристиками. Наведено результати модернізації газової турбіни Westinghouse.

Авторами в ряде работ представлены новые возможности повышения общей эффективности ГТУ за счет совершенствования проточных частей, то есть улучшения аэродинамических характеристик [1, 2]. Совершенствование проточных частей выполняется на основе визуальной диагностики структуры потоков. Для проведения визуальной диагностики изготавливаются модели с профилем характерного сечения проточной части. Полученные картины визуальной диагностики структуры потоков характеризуют поле мгновенных значений скоростей в исследуемом элементе проточной части [3]. В качестве объекта исследований выбраны второстепенные элементы проточной части ГТУ входные-выходные патрубки. На рис. 1.а показан чертеж характерного сечения проточной части входного патрубка компрессора ГТУ Westinghouse, по которому изготавливались плоские модели его проточной части. На рис. 1.б показаны результаты визуальной диагностики структуры потока в плоской модели проточной части входного патрубка ГТУ Westinghouse.

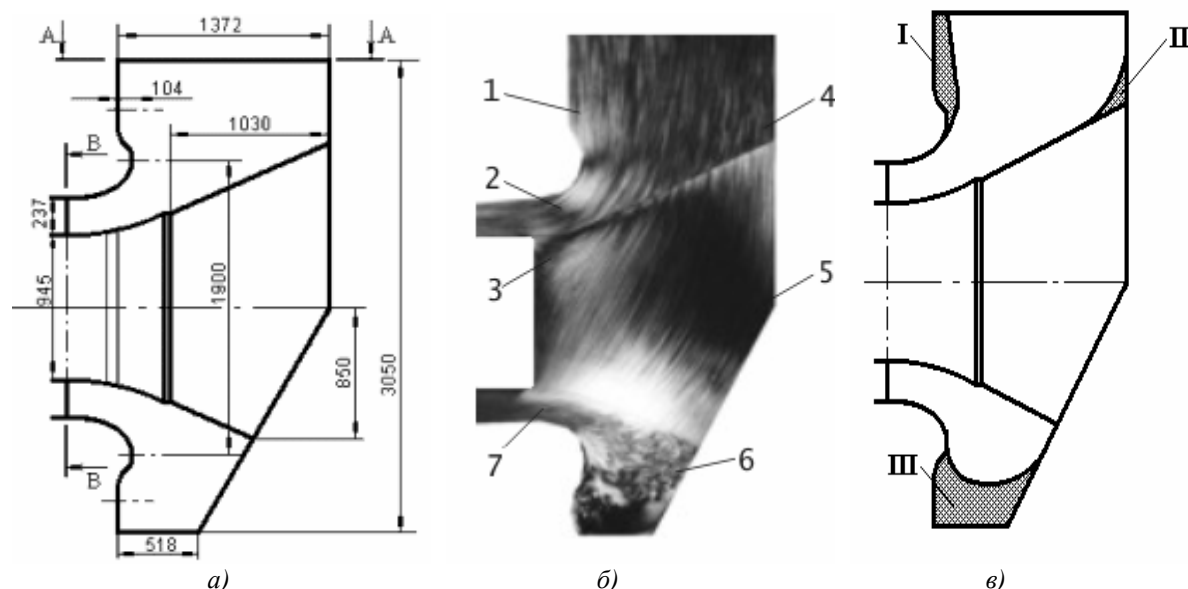


Рис. 1 Модернізація проточної частини входного патрубка компресора ГТУ Westinghouse  
а) чертеж характерного профіля проточної частини входного патрубка компресора ГТУ«Westinghouse»; б) результат візуальної діагностики структури потоку; в) варіант 1 модернізації проточної частини входного патрубка компресора в рамках границь існуючої конструкції ГТУ Westinghouse;

Анализ визуальных картин демонстрирует, что структура потока во входном патрубке имеет большое количество участков с отрывом потока от стенки, которые можно характеризовать как зоны диссипации энергии. В проточной части входного патрубка ГТУ Westinghouse движение воздуха в патрубке имеет как минимум 7 диссипативных зон. На рис. 1,в представлен чертеж характерного сечения модернизации проточной части входного патрубка компрессора ГТУ «Westinghouse» в рамках границ существующей конструкции (вариант 1). Модернизация может быть выполнена за счет использования вставок-легал замещающих диссипативные зоны проточной части. Были выполнены также исследования с целью модернизации проточной части входного патрубка компрессора ГТУ General Electric, требующий изменения границ существующей конструкции (вариант 2).

Для сравнения аэродинамических характеристик существующего оборудования и оборудования с новой проточной частью, разработанного на основе диагностики потоков выполнены лабораторные испытания объемных моделей. Для проведения лабораторных сравнительных испытаний были изготовлены четыре модели:

- модель существующей проточной части входного патрубка ГТУ Westinghouse, изготовлена в масштабе 1:12 по чертежу на рис. 1,а.
- модель существующей проточной части входного патрубка ГТУ General Electric, изготовлена в масштабе 1:12 по чертежу на рис. 2,а.
- модель новой проточной части Westinghouse (вариант 1), изготовлена по чертежу 1,в.
- модель новой универсальной проточной части для General Electric (вариант 2) изготовлена по чертежу 2,в.

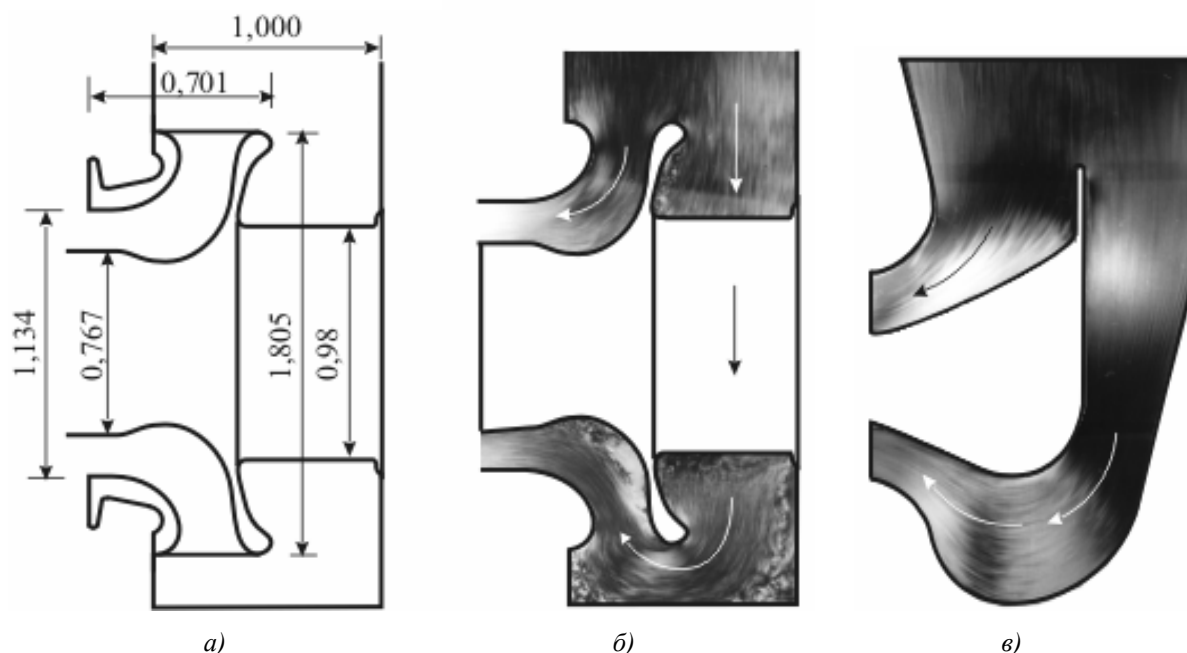


Рис. 2 Модернизация проточной части входного патрубка компрессора газовой турбины General Electric. а) чертеж характерного профиля проточной части входного патрубка компрессора ГТУ General Electric; б) результат визуальной диагностики структуры потока; в) вариант 2 модернизации проточной части ГТУ с изменением конфигурации проточной части.

По результатам испытаний четырех моделей на аэродинамическом стенде построены характеристики. На рис 3а показана зависимость величин потерь напора –  $\Delta P$  от изменения скорости воздуха –  $V$  в максимально сжатом сечении  $\Delta P = f(V)$ . На

рис 3,б представлены зависимости  $\zeta = f(Re)$  коэффициентов аэродинамического сопротивления при различных числах Рейнольдса.

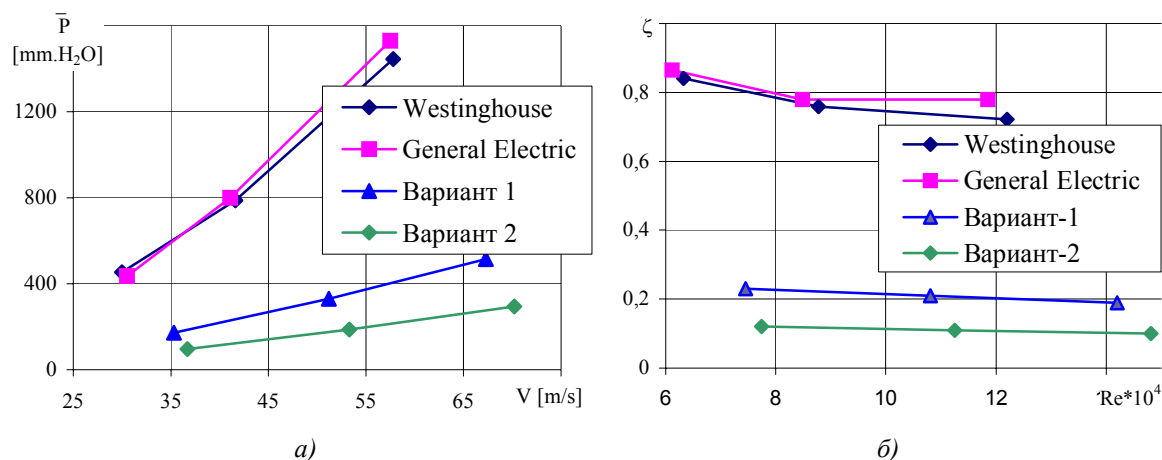


Рис. 3. Результаты испытаний четырех моделей на аэродинамическом стенде

а) зависимость потерь напора от скорости воздуха  $\Delta P = f(V)$  в максимально сжатом сечении входного патрубка; б) зависимость коэффициентов аэродинамического сопротивления от числа Рейнольдса  $\zeta = f(Re)$ .

Как видно из графиков, модернизация входного патрубка компрессора позволяет снизить потери напора во входном патрубке на 60% по варианту 1. Модернизация входного патрубка компрессора по варианту 2 снижает потери напора более чем на 80%. Совершенствование проточных частей входного патрубка позволяет снизить величину коэффициентов сопротивлений моделей в 4 раза по первому варианту модернизации, и в 8 раз по второму варианту модернизации. Причем, характер зависимости  $\zeta = f(Re)$  в моделях оптимизированных проточных частей имеет более пологий характер, чем в моделях существующих проточных частей ГТУ.

В 1997 году была выполнена модернизация ГТУ «Westinhouse» на ТЭС Bruch (США). С дирекцией ТЭС Bruch была согласована технология модернизации по варианту 1. Она заключалась в установке внутри патрубка деревянных шпангоутов-лекал, промежутки между которыми были заполнены наполнителем. Наружная поверхность шпангоутов-лекал и наполнителя была покрыта брезентом, пропитана эпоксидной смолой, что позволило обеспечить жесткость конструкции. Главным результатом испытаний ГТУ №1 Westinhouse на ТЭС Bruch явилось снижение потерь напора входного патрубка компрессора на 56,5 %. Величина коэффициента сопротивления входного патрубка до модернизации составляла  $\zeta = 0,54$ . Совершенствование проточной части входного патрубка на основе структуры потока воздуха позволила уменьшить величину коэффициента сопротивления до  $\zeta = 0,13$ , то есть более чем в 4 раза. Снижение потерь напора во входном патрубке компрессора обеспечило увеличение расхода воздуха на турбину более 20% [4].

Для анализа процессов в ГТУ рассмотрим Ts-диаграмму параметров компрессора ГТУ до и после модернизации входного патрубка компрессора (рис. 4).

На Ts-диаграмме представлены процессы сжатия воздуха в компрессоре с расшифровкой диссипативных явлений потерь энергии на преодоление аэродинамических сопротивлений во входном патрубке до и после модернизации входного патрубка компрессора ГТУ. Так процесс сжатия воздуха в компрессоре до модернизации можно представить изменением параметров  $P_{ат} P_1 P_2$ , где процесс  $P_1 - P_2$  отражает работу сжатия воздуха за счет механической энергии вращения компрессора, а процесс  $P_{ат} - P_1$  отражает потери напора во входном патрубке компрессора за счет преодоления сопротивления  $\zeta = 0,54$ .

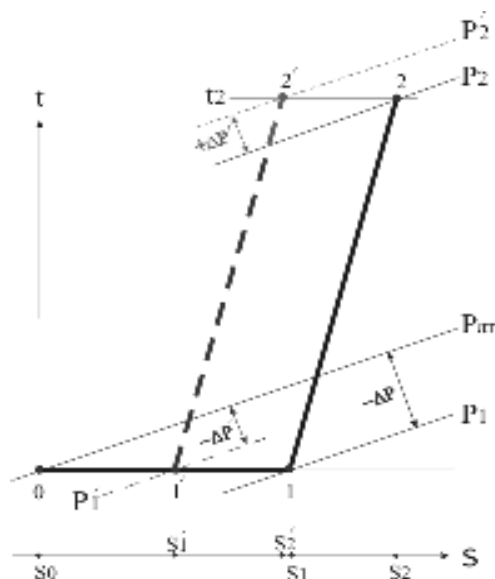


Рис. 4. Ts-диаграмма параметров компрессора ГТУ до и после модернизации входного патрубка компрессора.

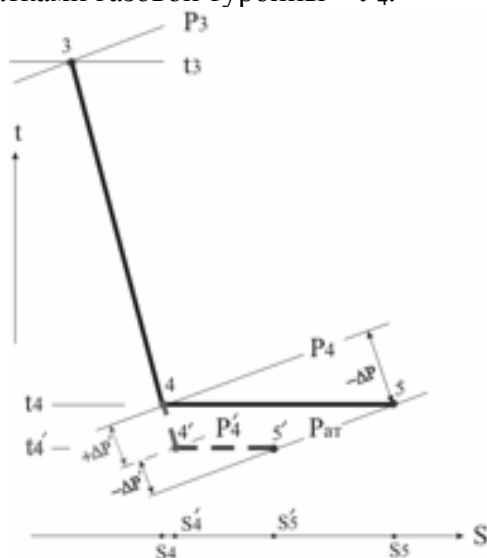
$t$  – температура воздуха;  
 $s$  – энтропия воздуха;  
 $P_{ат}$  – давление атмосферного воздуха.  
 $P_1; P'_1$  – давление воздуха перед компрессором соответственно до и после модернизации входного патрубка;  
 $P_2; P'_2$  – давление воздуха за компрессором соответственно до и после модернизации входного патрубка;  
 $P_{ат}, P_1, P_2$  – процесс сжатия воздуха в компрессоре до модернизации входного патрубка;  
 $P_{ат}, P'_1, P'_2$  – процесс сжатия воздуха в компрессоре после модернизации входного патрубка.

После модернизации входного патрубка компрессора величина сопротивления была уменьшена до величины  $\zeta = 0,13$ . Это позволило обеспечить процесс сжатия воздуха с параметрами  $P_{ат} P_1 P_2$  с меньшей величиной разряжения в патрубке  $P'_1$ . Величины изменения параметров  $P_1- P_2$  и  $P'_1- P'_2$  остаются неизменными, так как эффективность процесса сжатия в компрессоре остается неизменной. Поэтому процесс перехода механической энергии вращения компрессора после модернизации реализован более эффективно с повышением давления за компрессором до величин  $P'_2$ . Процесс сжатия воздуха в компрессоре после модернизации входного патрубка представлен пунктирной линией  $P_{ат} P'_1 P'_2$ , он реализован с меньшей величиной повышения энтропии. Результатом модернизации входного патрубка компрессора является увеличение расхода воздуха на турбину и при соответствующем увеличении подачи топлива можно увеличить мощность ГТУ.

Из гидравлических справочников известно, что сопротивления выходных участков ГТУ имеют большую величину, чем сопротивления входных патрубков. Например, если диапазон сопротивлений входного патрубка ГТУ  $\zeta = 0,12-0,6$ , то величина сопротивлений выходных участков составляет  $\zeta = 0,3-1,13$ . Поэтому снижение величин сопротивлений выходных участков может дать существенное приращение мощности и эффективности. Для представления результатов совершенствования выходного патрубка турбины рассмотрим Ts-диаграмму параметров рабочих процессов ГТУ до и после модернизации (рис. 5).

Точкой начала процесса расширения газа 3 является пересечение линий температуры перед турбиной  $t_3$  и линии величины давления  $P_{Г3}$ . Неизменным параметром этого процесса является величина противодавления  $P_{Ат}$  – величины атмосферного давления. Характер изменения процесса расширения газа в газовой турбине до и после модернизации выхлопного патрубка отличается участком диссипации энергии на преодоление аэродинамического сопротивления. После модернизации выходного патрубка потери напора  $\Delta P$  могут быть снижены на 50% и более. Величина работы, которую обеспечивает турбина за счет совершенствования

газа, увеличивается за счет снижения величины давления за рабочими лопатками газовой турбины  $P'_4$  и соответственно снижению температуры газов за рабочими лопатками газовой турбины –  $t'_4$ .



$P_3$  – давление газа перед газовой турбиной;  
 $P_4$  – давление газа после газовой турбины перед выхлопным патрубком;  
 $P_{atm}$  – атмосферное давление;  
 $P_3, P_4, P_{atm}$  – процесс расширения газа в турбине до модернизации входного патрубка.  
 $P'_3, P'_4, P_{atm}$  – процесс расширения газа в турбине после модернизации входного патрубка.

Рис.5. Ts-диаграмма параметров газовой турбины до и после модернизации выходного патрубка.

Таким образом, после модернизации мощность турбины увеличивается только за счет оптимизации аэродинамики выходного патрубка без увеличения расхода топлива на турбину. Анализ полученных результатов показал, что снижение потерь напора «входных» и «выходных» элементов газовых турбин с использованием диагностики потоков дает хорошие перспективы. Не меняя проточных частей сложных элементов компрессора и турбины, а только за счет изменения геометрии «входных» и «выходных» элементов (снижая потери напора в этих элементах) можно существенно увеличить производительность газовых турбин, улучшить их энергетические, стоимостные, габаритные и другие характеристики.

### Литература

1. Мазуренко А.С., Арсирій В.А. Совершенствование проточных частей оборудования ТЭС на основе структуры потоков в физических моделях // Труды Межд. научно-техн. конференции «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования» – Харьков. – 2003. – С.420-424.
2. Мазуренко А.С., Арсирій В.А. Совершенствование проточных частей оборудования на основе диагностики потоков // IX Forum of Power Engineers, Tom II, Opole, 2003-2004, С. 402-408.
3. Пат. PST 5.838.587 USA Method of restricted space formation for working media motion. / Maisotsenko V. S., Arsiri V. A. – Publ. 07.11.1998.
4. Арсирій В.А., Майсоценко В. С., Олесевиц Є.К. Модернізація вхідних та вихідних елементів проточних частин обладнання з використанням FST-технології// Ринок інсталяційний. – 1998. – № 11. – С. 5-7.

© Мазуренко А.С., Арсирій В.А., 2005